

■ 研究紹介

T2K 実験の陽子ビームモニター

KEK 素粒子原子核研究所

柴田 政宏 Nicholas C. Hastings 石井 孝信
masahiro.shibata@kek.jp hastings@neutrino.kek.jp ishii@neutrino.kek.jp

東京大学大学院理学系研究科

角野 秀一

kakuno@hep.phys.s.u-tokyo.ac.jp

2010年2月12日

1 はじめに

本稿では T2K 実験の陽子ビームラインで使用しているビームモニターについて紹介する(T2K 実験全体に関しては本誌前々号の記事[1,2,3]を参照)。陽子ビームラインでは加速器から取り出したビームが標的まで輸送されるが、その際に重要なことは、標的でのビーム位置およびサイズの制御とビームロスを抑えることである。標的でのビーム位置は生成されるニュートリノの方向に影響を与え、ニュートリノの方向を1mradの精度で合わせるためには、ビーム位置を1mmの精度で制御しなければならない。また、陽子ビームは750kWという大強度なので、ビームが標的に對して偏って当たったり、ビームサイズが細くなりすぎたりすると標的を破損する可能性がある。ビームロスに関しては、場所にもよるがもっとも条件の厳しい部分では1W/m以下に抑えなければならない。また、生成されたニュートリノビームのフラックスを見積るためにPOT(protons on target)の測定を行う。

上記の目的を達成するために、陽子ビームラインには強度、位置、プロファイルおよびロスの4種類のモニターが設置されている(図1)。以下の各章でそれぞれのモニターの詳細について、コミショニングで得られたデータも交えて紹介する。

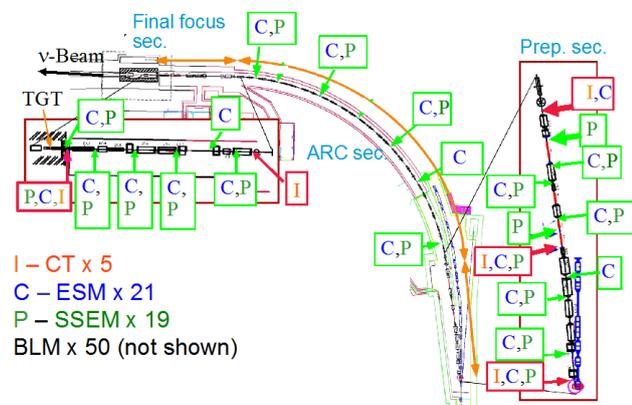


図1 ビームモニターの配置図

I: 強度モニター, C: 位置モニター, P: プロファイルモニター, BLM: ロスモニターを表す。

2 ビーム強度モニター

CT(current transformer)を用いてビーム強度を測定する。得られたデータから、ビームの安定性、輸送効率、POTが算出される。また、DAQのゲートに対してビーム信号がどこにあるかというビームタイミングの測定にも使用される。そのため、われわれのビーム強度モニターでは、単に積分電荷を測定するのではなく、ビームの時間構造も測定できるようにCTの中でも応答の速いFCT(fast current transformer)が用いられている。

2.1 原理

CTは強磁性体をコアにしたトロイダルコイルを用いた電流トランスであり、ビームを一次電流、信号を二次電流として動作する。つまり、信号電圧 V は、ビーム電流 I 、読み出し抵抗 R 、コイルの巻数 N に対して、 $V = IR/N$ で表される。この式から分かるように、信号がビーム電流(強度)に比例するので、ビームの時間構造も測定することが可能である。ただし、上式が成立するのはCTのインダクタンスと浮遊容量から決まる平坦応答領域と呼ばれるある周波数領域においてのみである。さらに、コアがビームの周波数成分に対して強磁性体であることと、コアが飽和していないことの2点も必要である。

2.2 実際のCT

取り出したビームは一つのパルスの中に幅20~60nsのバンチが581ns間隔で並ぶという時間構造をしている(図2)。そのため、時間構造を押さえるには10kHz~50MHzという幅広い平坦応答領域が必要となる。また、ビーム強度は電流に直すとピークでは瞬間的に200Aにも達するので、飽和しないコアを選ばなければならない。

そこで、コアには幅広い周波数領域での比透磁率と飽和磁束密度の両方に優れるファインメット(日立金属製)を用いている。ビームダクトの大きさに合わせて内径260mm、重量7kgの比較的大型のものを使用するので、十分な機械強度を持たせるためにエポキシ含浸を施している。このコア

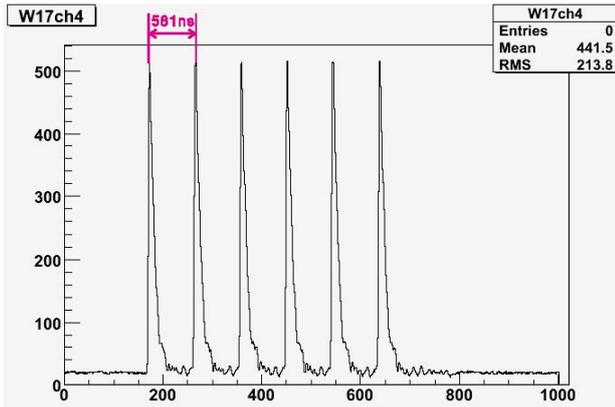


図2 取り出したビームの時間構造(CTを用いて測定したもの)

に銅線を50回巻いてトロイダルコアが構成されている。コアと銅線との絶縁には耐放射線性を考慮して、ポリイミドテープとアルミナ繊維テープが使用されている。

ビームが完全に導体に覆われていると測定ができないので、CTを設置する場所はビームダクトがセラミックブレイクになっている。セラミックブレイクの上にトロイダルコイルが設置され、さらに外部からの電磁ノイズを遮蔽するための鉄シールドが取り付けられている(図3)。

ビームラインから読み出しエレキの設置されている制御室までは約100mの距離があるが、20D コルゲート型ケーブルを用いることによって信号のロスとは2~3%に抑えられている。読み出しには160MHzのFADCが用いられている。入力段で時定数50nsのシェイパーを用いて高周波成分をなまらせ、情報のロスを防いでいる。図2は実際にFADCで取得したCTの信号である。1パルス内のそれぞれのパンチに対する陽子数を測定することが可能である。

較正はCTをビームラインに設置した後、実際の運転時とまったく同じ状態で行っている。コイルに信号線とは別にワイヤーが一巻きされていて、これに信号生成器からテ

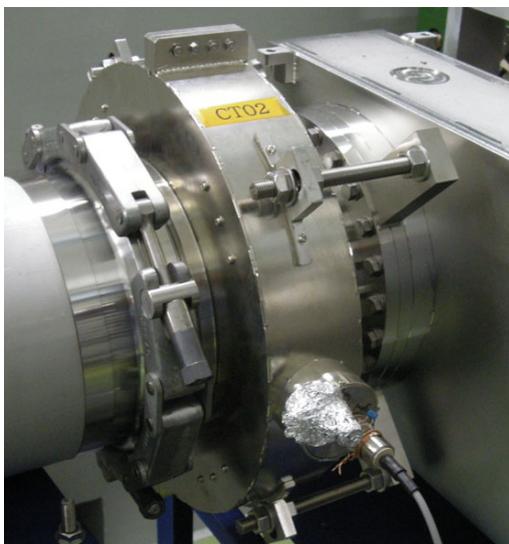


図3 CTの外観

スト信号を入力し、FADCで読んだ信号と比較して変換係数を決定した。

2.3 ビームコミッショニングの結果

2009年4月のコミッショニング開始からこの原稿の執筆時まで、計27日間ビームコミッショニングが行われた。CTの動作は概ね好調で期待通りの性能を発揮している。

われわれのビームラインには図1に示されているように計5台のCTが設置されているが、この5台間での測定値の相対誤差は1.6%であった。また、5台のCTの平均値と加速器リング内での測定値との相対誤差は1.2%である。これらの誤差は、ビームライン、加速器取り出し部ともに、0.01%を超えるようなビームロスを検出されていないことから考えると、CT自体の測定精度によるものである。この誤差はそれぞれのCTの周波数特性に個性があることによるものだと考えているが、実験を行う上では十分な精度である。

図4は連続運転時の測定結果をプロットしたものである。約3%強度が変動しているが、加速器リング内のビーム強度の変化によるものであることが分かる。また短期的な測定結果のばらつきはRMSで約1%程度であるが、このばらつきにもビーム強度自体のふらつきが含まれている。5台のCT間の相関をとることによって、ビーム強度のふらつきを差し引くとCTに由来する測定結果のふらつきは0.5%となる。つまり、1ショット毎に0.5%の精度でビームの安定性をチェックすることが可能である。この0.5%という結果はFADCのサンプリングタイミングによる誤差とノイズから予想される値とよく一致している。

ビームタイミングの測定には、一つ目のパンチのピーク位置を用いている。タイミングは加速器のRFの設定によって変わることが観測されているが、RFの設定を固定した後はふらつきがRMSで5ns以下と非常に安定している。

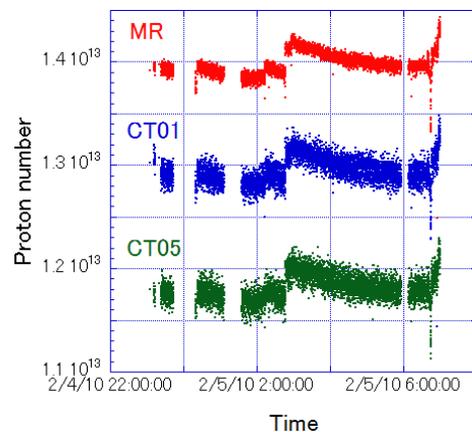


図4 連続運転時のビーム強度の安定性
加速器リング内(MR)、ビームライン最上流(CT01)、最下流(CT05)を示す。見やすいように、MRとCT05の測定値は 0.1×10^{13} ずらしてプロットしてある。

3 Beam position monitor

To ensure the stability of the beam along the beamline and at the target, 21 Beam Position Monitors (BPMs) were installed.

Constraints for the BPMs included: mechanical robustness, radiation hardness, nondestructive measurements (no direct interaction with the beam), and the ability to operate over a large dynamic range, from beam tuning with only 10^{10} protons per bunch up to 10^{13} protons per bunch, accuracy and bunch position resolution to better than 0.5 mm. Beam tests were performed and the decision was made to adopt conventional Electrostatic Monitor (ESM) design with rectangular electrodes with 80° coverage per electrode. The inside of an ESM is shown in Fig. 5.

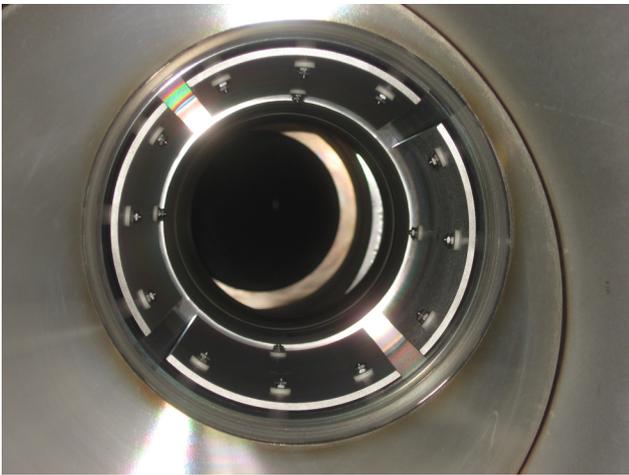


Figure 5 An ESM viewed from inside the beampipe.

Fifteen 125 mm long ESMs were installed in the normal conducting sections, and five 210 mm long ESMs were installed in the superconducting arc section of the beamline. A third type of ESM of 160 mm length was installed in the ‘‘Monitor Stack’’ located in the wall between the primary beamline and target station—containing the beam target and focusing horn magnets. The ESMs lengths were maximized given the geometrical constraints of the beamline in order to increase the signal size for very low beam intensities.

Prior to installation the response of the ESMs were mapped by simulating the beam with a current carrying wire. Each ESM was placed on a 2D X-Z stage. To simulate a particle beam a current carrying wire was threaded through the ESM and the monitor responses were recorded for a grid of 91 relative beam/wire positions. By fitting the signal sizes for the different wire positions the relative gains of the four electrodes were determined to a precision of 0.1%.

To an excellent approximation the beam produces only a transverse electric field which produces an image charge on the ESM electrodes. The capacitance between the electrode and the beampipe wall acts as a differentiator circuit, resulting in the ESM raw signals representing the first time derivative of the beam bunch shape. As such, the signals are bipolar, very fast and not easy to treat with conventional low pass filter/integrator circuits.

The signals on the installed ESM electrodes are transported from the beamline to the readout electronics by cables averaging 100 m in length. These signals are then optionally passed through attenuators before being sampled by 12 bit, 160 MHz Fast ADCs (FADCs).

The four waveforms from one ESM for a single bunch, digitized and sampled by the FADC are shown in Fig. 6.

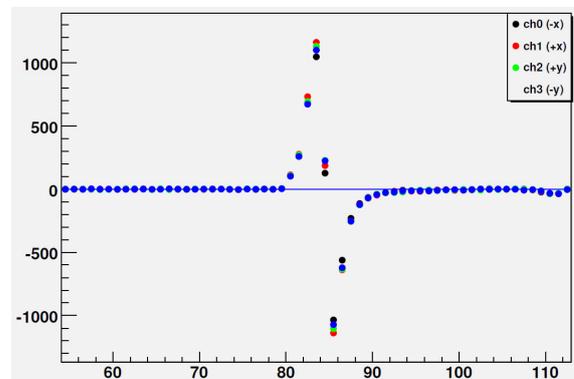


Figure 6 Waveforms from four ESM channels digitized by the 160 MHz FADC.

To the leading order the beam position within an ESM can be determined simply from the asymmetry in signal sizes between opposite electrodes. For example the beam horizontal position could be given by $x \propto \frac{L-R}{L+R}$ where L and R represent signal sizes from the two electrodes in the horizontal plane, and the constant of proportionality is a function of monitor radius and electrode angular coverage. However, this simplistic analysis method becomes invalid when the beam is not close to the centre and ignores the constraints that can be applied by using information from the third and fourth electrodes in an ESM. For these reasons, the four signals are fit to the theoretical response (using higher order terms) of the ESM (with channel gain calibration results applied) to obtain both x and y beam positions and an additional parameter proportional to the overall signal size. Using this method the ESMs have provided beam position measurements with a linear response for beam displacements up to half the beampipe radius from the beampipe centre.

During stable beam operation with 2×10^{12} protons per bunch and six bunches per spill, the ESMs have provided bunch-by-bunch beam position measurements with 0.5 mm and 0.3 mm resolution in the super and normal conducting sections of the beamline, and spill average (combined measurement of six bunches) measurements of 0.3 mm and 0.2 mm.

Further work is being undertaken to minimize noise and crosstalk and to treat backgrounds in the waveforms caused by charged particles directly deposited on the ESM electrodes.

4 ビームプロファイルモニター

ニュートリノビームラインには 19 台の Segmented Secondary Emission Monitor (SSEM) をビームプロファイルモニターとして配置している。SSEM の原理を図 7 に示す。ストリップ状の金属薄膜をならべ、ビームが横切るように配置する。ビームがストリップを通過した際二次電子が放出されるが、その二次電子量は各ストリップを通過したビーム強度に比例するため、ストリップの位置を横軸にして二次電子量のヒストグラムをプロットすれば、そのヒストグラムはビームプロファイルに一致する。T2K 実験用に製作した SSEM には、 $5 \mu\text{m}$ のチタン箔を用いた。HV プレーンを挟んで 2 枚の信号プレーンを配置し、水平方向および鉛直方向のビームプロファイルの測定を行う。信号プレーンにはそれぞれ 2 mm, 3.5 mm または 5 mm 幅の 22 本のセンサーストリップを配置してビームプロファイルを測定し、さらにその外側に配置した数 cm の幅の広いストリップでビームハローを測定する。

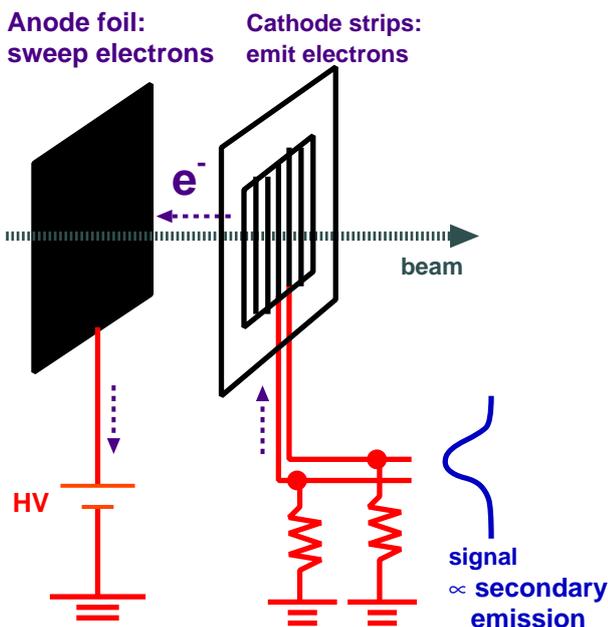


図 7 SSEM の動作原理

このモニターの利点は、直接的にビームの形を測定出来る点であるが、欠点として、ビームとモニターの相互作用による大きなビームロスおよびモニター自身の劣化がある。そのため T2K 実験においては、ビームチューニング時はビームプロファイルモニターをビーム中心に挿入してビームの診断に用い、定常運転時はビームラインから退避させる。

4.1 SSEM 駆動機構

19 台それぞれの SSEM にはビームラインから退避させるための駆動機構が取り付けられる。駆動機構にはターゲット直前の SSEM、超伝導ビームライン部の SSEM およびその他常伝導ビームライン部の SSEM の 3 種類がある。ターゲット直前の SSEM 駆動機構はカナダ TRIUMF グループによって開発された。ちなみにこの SSEM は万が一壊れた際に遠隔操作で交換できるよう設計されている。超伝導ビームライン部の駆動機構は KEK の機械工作センターおよび超伝導低温工学センターと共同開発を行った。超伝導ビームライン部の SSEM はその両側に設置された超伝導電磁石の冷却システムにより約 120 K 程度まで冷やされる。ビームラインへの熱流入を最小限に抑えるためには駆動機構を冷却された真空容器内に収める必要があり、上記の温度で動作する駆動機構の開発を行った。開発には真空に引いた駆動機構を液体窒素などで冷却して駆動させる試験を繰り返した。低温環境下で駆動機構を動作させるのが困難な点は材質の熱収縮であり、常温でスムーズに動作していても冷却すると熱収縮により駆動機構の一部がかしめられて動作しなくなってしまう。駆動機構の位置再現性を損なわないよう加工精度や固定箇所の見直しを繰り返し、インストール直前の 2008 年 7 月によく 80 K の低温環境下においてストレスなく駆動出来ることを実証できた。その後レーザートラッカーを用いた測定で約 $10 \mu\text{m}$ の精度で位置が再現することも確認され、全数 4 台のインストールを行った。図 8 は、そのうちの最初の一台のインストール時の写真である。



図 8 超伝導部の SSEM およびその駆動機構

その他の常伝導部の SSEM 駆動機構は、SSEM 用に特注で製作した直導入機を用いている。こちらも SSEM を駆動した際に約 $10\mu\text{m}$ の精度で位置が再現することが確認されている。

4.2 SSEM の信号読み出し

SSEM のチャンネル数は 19 台のモニターを合わせて総計約 900 になる。この数の信号ケーブルに同軸ケーブルを用いるのは現実的でなく、ツイストペアケーブルを用いてモニターから約 100m 程度はなれた建屋まで信号を伝送する。本実験では、マイクロバンチ毎にビームプロファイルを測定したいため、信号の長時間積分ではなく、波形そのものをサンプリングして解析する必要がある。そのためツイストペアケーブル 2 本の内信号ストリップに継ぎのない方をストリップ直前まで這わせて電氣的に浮かせておき、差動入力 of FADC でツイストペアケーブルの信号を読み出す。これによりツイストペアケーブルの一方でノイズ成分のみを測定し、差動入力 of FADC で差し引き、信号波形のみを取り出す。図 9 に典型的な 6 バンチビームに対する SSEM の波形を示す。大きなノイズやクロストークは見られない。なおこの差動入力 65MHz サンプリング of FADC は KEK 回路室によって開発され、ソウル大学で全数製作された。

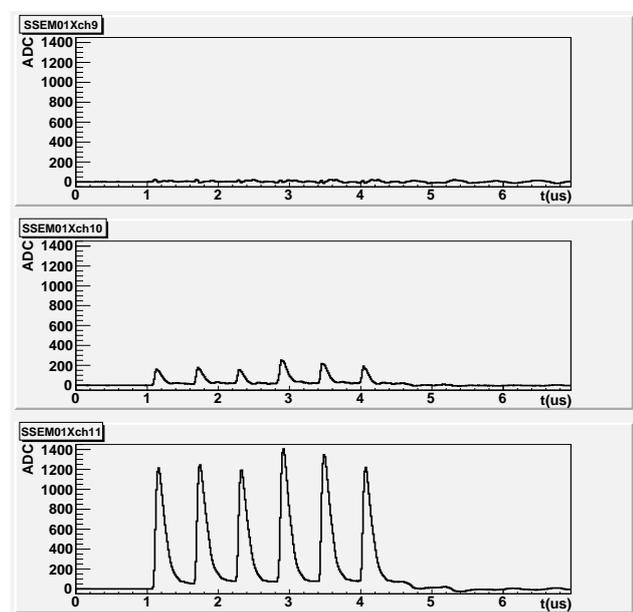


図 9 最上流 SSEM の中心付近のストリップの波形

上：中心から 2 ストリップ隣り，中：中心の隣り，下：中心のストリップ。2010 年 1 月， 2×10^{12} ppb，6 バンチビーム。

4.3 SSEM を用いたビームの診断

2009 年 4 月にビームコミッショニングが開始された。図 10 に一次ビームライン機器をすべて立ち上げた後の最初のビームのビームプロファイルを示す。SSEM はビームコミッショニング当初から正常に動作し、順調にビームコミッ

ショニングが行われた。SSEM で得られるビーム中心位置のショット毎の測定値のばらつきは約 $10\mu\text{m}$ 程度でビーム自身のばらつきに比べて十分小さく(図 11)，取り出しビームの安定性や電磁石の安定性を精度よく測定することができる。また紙面の関係から省略するが、SSEM によるビーム幅の測定から、ビームエミッタンス、ビーム取り出し位置の光学パラメータおよびターゲット位置でのビームサイズの見積りなどを行うことができる。これらの情報は加速器グループへのフィードバックや、T2K 実験におけるニュートリノ生成数のスタディにも役立てられている。

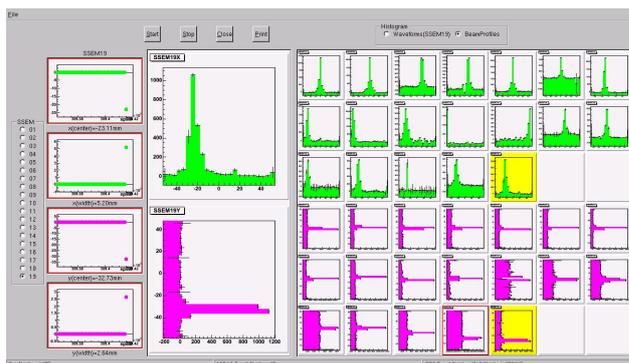


図 10 一次ビームライン機器をすべて立ち上げた後の SSEM のイベントディスプレイ

拡大されているビームプロファイルは最下流の SSEM で、ビームが最下流部まで通過したことが分かる。

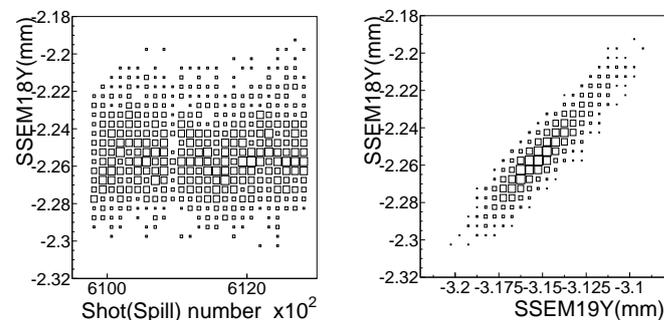


図 11 2010 年 1 月連続運転時の 2900 ショット(約 3 時間)の最下流部鉛直方向のビーム中心位置

左図：最下流部 SSEM のショット間のばらつき。右図：最下流部 2 台の SSEM の相関。ビーム自身がばらついていることが分かる。

5 ビームロスモニター

5.1 目的

ビームのロスをはかるのがビームロスモニター(BLM)である。ビームロスが多いと、ビーム量が減るばかりでなく、ビームライン機器が故障し、放射化によってそのメンテナンスに支障をきたす。BLM は、大きなビームロスが起こった時にビームを止め、機器のメンテナンスのために放射化を正確に予測し放射化を減らすためのビーム調整を促す。BLM は大強度加速器 J-PARC に必須の機器である。

5.2 検出器の選択

ニュートリノグループでは、BLMとしてアルゴンベースのガスを封じ込めたワイヤープロポーションアルカウンターを選んだ。これは、J-PARCの加速器で一般に使用されているものと同じものである。加速器と同じものにするによってそのノウハウを活かすことができる。

5.3 エレクトロニクス

バンチ毎のロスを見るために生信号を30MHzのFADCに入れることにした。また、各スピルでのロス信号の積分値によってアラームを出すことにした。そのために、BLMからの信号を入力とし、FADC用生信号と積分値によるアラーム用信号を出力とするBLM信号処理回路を製作した。積分波形自身も出力とした。ビームが周回しているメインリングなどと違って、ニュートリノビームラインの特徴は単発で大強度ビームが通ることである。そのために、処理回路は加速器のものを基礎としたがパラメータを大幅に変えなければならなかった。積分ゲインを大きくしたことによってノイズが問題となった。ゲートの間だけ積分するためのアナログスイッチからのノイズがどうしても落とせなかったのでゲート方式をやめ、放電抵抗をいれてビーム通過後適当な時間でラッチする方式とした。

5.4 設置

BLMは、前段部および最終収束部については、磁石の間にほぼ1台の割合でビームダクトの近くに設置した(図12)。アーク部(超伝導電磁石)については、おもに放射線に弱いとされるコールドダイオードの近くに設置してロスを監視するようにした。コールドダイオードは、超伝導ダブレット1組につき1個存在する。前段部に19台、アーク部に21台、最終収束部に10台の計50台を設置した。



図12 前段部に設置されたBLM

5.5 ビームロス測定

メインリングでは2008年12月に、陽子ビームを初めて30GeVまで加速し、速い取り出しでニュートリノビームラインの反対側のアポートラインに取り出した。そのときに、ニュートリノビームライン側に設置されているBLMでビームロス信号を検出した。これは、T2K測定器による初めてのビーム信号である。

ニュートリノビームコミッションング時のBLM信号を図13に示す。コミッションング時はほとんどの期間SSEMを挿入状態でビームを出している。1台のSSEMのチタン箔によってビームの0.005%をロスする。SSEM物質はBLMにとってはよい較正材料となる。図14には各BLMで測ったビームロスを示す。SSEMを引き出して退避させるとロスはほとんどなくなることがわかる。

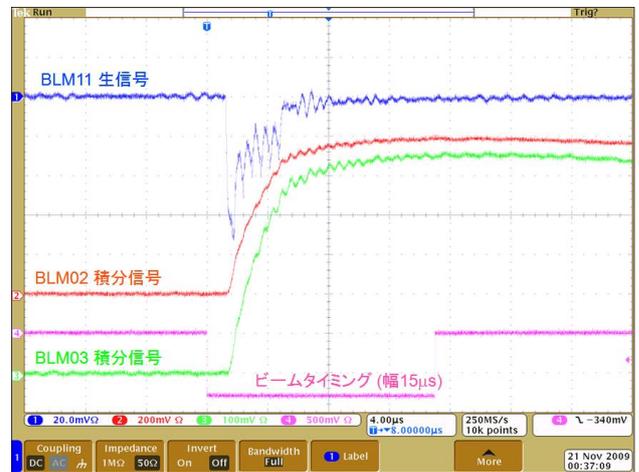


図13 BLMの信号波形

上から、BLM11の生信号、BLM02の積分信号、BLM03の積分信号、ビームタイミング信号。

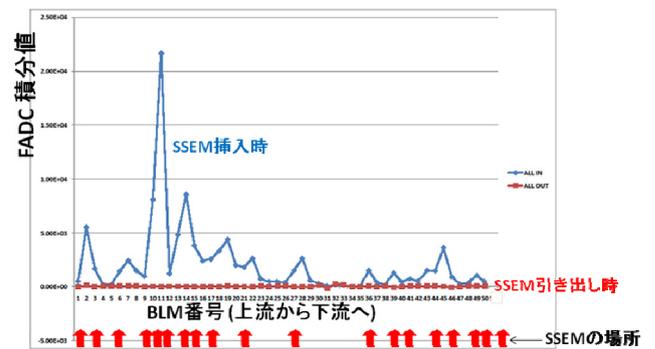


図14 各BLMで測ったビームロス (4×10^{11} ppb, 1バンチ時) SSEM挿入時(上: 菱形点)と SSEM引き出し時(下: 四角点)のFADC信号の積分値をプロットした。

5.6 強度依存性

2009年5月のランでは故意にロスを増やすなどして、BLMの応答のビーム強度依存性を測定した。電荷にして約0.2nCまでは直線性が見られたが、それ以上で飽和していることがわかった。この強度依存性データを用いて、その後のデータを補正することにした。

5.7 フィルムバッジ測定

一定期間 BLM にフィルムバッジを貼り付け、その間に受けた放射線量を測定した。その結果、フィルムバッジ測定による放射線量と BLM 信号の積分値の和とはよい比例関係にあることが確かめられた。

5.8 残留放射線測定

長期ランの終了後、磁石の入口と出口での残留放射線を測定した。現在のビーム強度では最大のところでも $100 \mu\text{Sv/h}$ 程度であった。今後、ビーム強度はますます上がっていくことが期待される。そういった中で電磁石やビームモニターのメンテナンスのためビームダクトの近くでの作業がありうる。放射化を抑えながらビーム運転しなければならない。どのくらいのロスまで許されるかを知るために、残留放射線量と BLM のデータとを比較した。残留放射線測定点と BLM の場所とは必ずしも一致しないが、もっとも近いもの同士を比べた。BLM データから残留放射線量を求める換算係数を二つのランで比較すると、図 15 に示すようによい一致を見た。この事実は、BLM データから残留放射線量を予言できることを意味する。今後はこの関係を用い、放射化を抑えながら物理に使えるビームを供給していく。

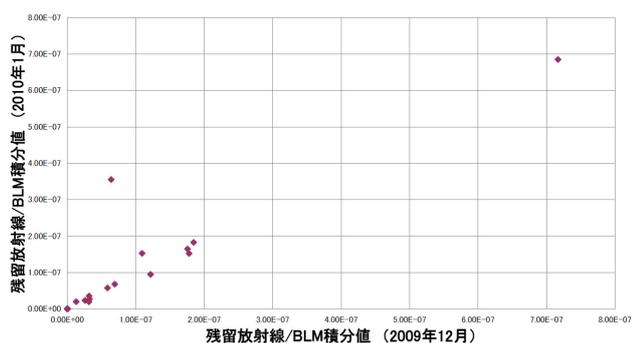


図 15 BLM の残留放射線推定能力

6 さいごに

本稿では T2K 実験の陽子ビームモニターについて紹介した。昨年 4 月の実験開始からすべてのモニターが順調に稼働しており、今後の物理データ取得のための長期連続運転においても十分な性能を発揮すると期待される。

謝辞

本稿で紹介した陽子ビームモニターの開発に際しては J-PARC メインリングのモニターグループの方々をはじめとして、多くの方からのご助言およびご支援をいただきました。この場をかりて厚くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 小林 隆, 「T2K 実験の概要」, 高エネルギーニュース **28-2**, 62 (2009).
- [2] 藤井芳昭, 山田善一, 「ニュートリノ実験施設の概要」, 高エネルギーニュース **28-2**, 67 (2009).
- [3] 荻津透, 榎田康博, 「J-PARC ニュートリノビームライン用超電導複合磁場電磁石システムの開発」, 高エネルギーニュース **28-2**, 76 (2009).